

論文

[1083] コンクリート構造物の経年変化推定のための劣化の確率密度関数化の検討

正会員○桜井 宏(北見工業大学工学部)
 正会員 鮎田耕一(北見工業大学工学部)
 正会員 佐伯 昇(北海道大学工学部)
 鈴木明人(大成建設技術本部)

1.はじめに

コンクリート構造物の経年変化の程度は、設計、施工及び材料等による内的要因と環境、気象及び荷重等による外的要因の多くの要因の組み合わせとそのばらつきによって変動する。そのため、構造物に発生する各種の劣化は、各々を劣化指標で表すとばらつきを持った変数となっていると考えられる。したがって、経年変化を推定するためには劣化を適切な劣化指標で表し、それを確率変数として把握するとともにその適切な確率密度関数を求める必要がある。

本研究は、劣化を確率密度関数化して把握することを検討するため、一例として寒冷地海洋環境下でコンクリートに発生する劣化現象の表面剥離を取り上げその劣化の発生と進行の程度を確率密度関数化することを試みる。寒冷地海洋環境下におかれたコンクリート構造物は凍結融解作用や海水によりコンクリート表面が洗われて摩耗するなど物理的作用や海水中のSO₄²⁻などの成分による化学的作用を受ける。したがって経年的にコンクリート表層部に表面剥離やポップアウト等の劣化を受ける。これらの劣化の発生形態やその進行は寒冷地海洋環境下のコンクリート構造物の耐用年数を把握する上で重要である。ゆえに、寒冷地海洋環境下のコンクリート構造物の劣化の形態の一つである表面剥離による剥離深さ、剥離面積率及びそれらより求める剥離度を劣化指標とし、曝露実験による測定データよりその発生した劣化の程度とその度数の関係を明らかにして確率密度関数化する。またその特徴を考察するとともに定量的で信頼性を考慮した経年変化の推定をするための基礎的な検討を行う。

2.検討方法

2.1検討の手順

コンクリートの劣化程度とその度数の関係を把握するために寒冷地海洋環境下である紋別の曝露実験による9年間の測定データから剥離深さ(mm)、剥離面積率(%)及び剥離度(mm: {剥離面積Xはくり深さ}/対象とした全面積)を求めた。これらのデータより劣化の発生程度とその頻度を適切に分析するため確率密度関数及び累積分布関数(ワイブル分布(Weibull Distribution))への適合を行った。またその累積分布関数の有意性を検定しその適合性も検討した。さらに確率密度関数の母数と経過年数及び内的要因の関係を考察した。

2.2劣化データの確率密度関数化及び累積分布関数化(ワイブル分布化)

一般に、特性値を求める測定等を行うと必ずデータ等のばらつきを生じる。これは、測定の際の供試体の不揃いや測定技術の優劣等によることもあるが、これらの原因を取り除いてもなお材料の特性値の本質から来るばらつきが存在する。特性値を確率変数としてとらえ、その変数の累積分布関数の主なものは、正規分布、対数正規分布及びワイブル分布(2母数,3母数)がある。本研究のように寒冷地海洋コンクリート構造物の劣化の程度とその度数を累積分布関数化する場合、正規分布ではその分布が-∞より+∞にわたり、また対数正規分布では標準偏差が大きくなったときは山形が低くなだらかなるが左右対象ではなく左側に常に歪んだ分布となる。そこで、本研究では対象とするコンクリートの劣化のデータが、マイナスの値をとらない変量の分布に良くあてはまりかつ累積分布関数が厳密に求められるワイブル分布を用いることが適切と判断される。したがって、ワイブル分布により劣化データの確率密度関数化及び累積分布関数化を行う。

ワイブル分布の一般式を示すと以下ようになる。

$$\text{確率密度関数: } f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{x-\gamma}{\beta} \right)^\alpha \right], \quad x \geq \gamma \quad (1)$$

$$\text{累積分布関数: } F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \text{-----(2)}$$

$$\text{平均値: } \mu = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + \gamma \quad (\Gamma: \text{ガンマ関数}) \text{-----(3)}$$

$$\text{分散: } \sigma^2 = \beta^2 \left[\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right\}^2 \right] \text{-----(4)}$$

ここで、 α は形状母数、 β は尺度母数、 γ は位置母数である。この分布の定義域は、 $x \geq \gamma$ で、本研究の解析に関しては $\gamma=0$ とおき2母数ワイブル分布とした。

これらより変動係数は次のように計算される。

$$cv = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\Gamma(1+2/\alpha) - \{ \Gamma(1+1/\alpha) \}^2}}{\Gamma(1+1/\alpha) + \gamma/\beta} \text{-----(5)}$$

これより変動係数(cv)と形状母数 α が1対1に対応するため α からデータのばらつきの大きさを推定することができる。

2.3 検討データ

筆者らが寒冷地海洋環境下の紋別で継続している表-1に示す条件の曝露試験⁴⁾の2年から9年経過までのデータを用いた。これらを、先の2.2に示したワイブル分布に適合させるため線形推定法の一つである相関係数法を用いて α 、 β の値を求めた。

表-1 曝露した供試体の環境条件から決まる外的要因と材料、配合、施工等の内的要因の条件

外的要因		内的要因														
年凍結融解回数(回)	海岸(汀線)からの距離(m)	供試体	セ	W	養	養	供試体	セ	W	養	養					
		No.	メ	ン	生	生	メ	ン	生	生						
59.4 (8年間 の平均)	30~50 (時期に より変動)	1	N	5	F	0	7	FB	5	F	0	13	BB	5	F	0
		2	N	5	F	5	8	FB	5	F	5	14	BB	5	F	5
		3	N	5	F	14	9	FB	5	F	14	15	BB	5	F	14
		4	N	4	F	0	10	FB	4	F	0	16	BB	4	F	0
		5	N	4	F	5	11	FB	4	F	5	17	BB	4	F	5
		6	N	4	F	14	12	FB	4	F	14	18	BB	4	F	14

N: 普通ポルトランドセメント

FB: フライアッシュセメントB種、

F: 淡水養生、注。各供試体につき12面の測定面がある

BB: 高炉セメントB種

3. 検討結果及び考察

3.1 検討結果

(1) 劣化の程度と頻度のヒストグラム

測定データを普通ポルトランドセメント，フライアッシュセメントB種及び高炉セメントB種の各母集団に別に，剥離深さ，剥離面積率及び剥離度を各ランクに分けた度数を示したヒストグラムで求め，図-1から図-3に示した。

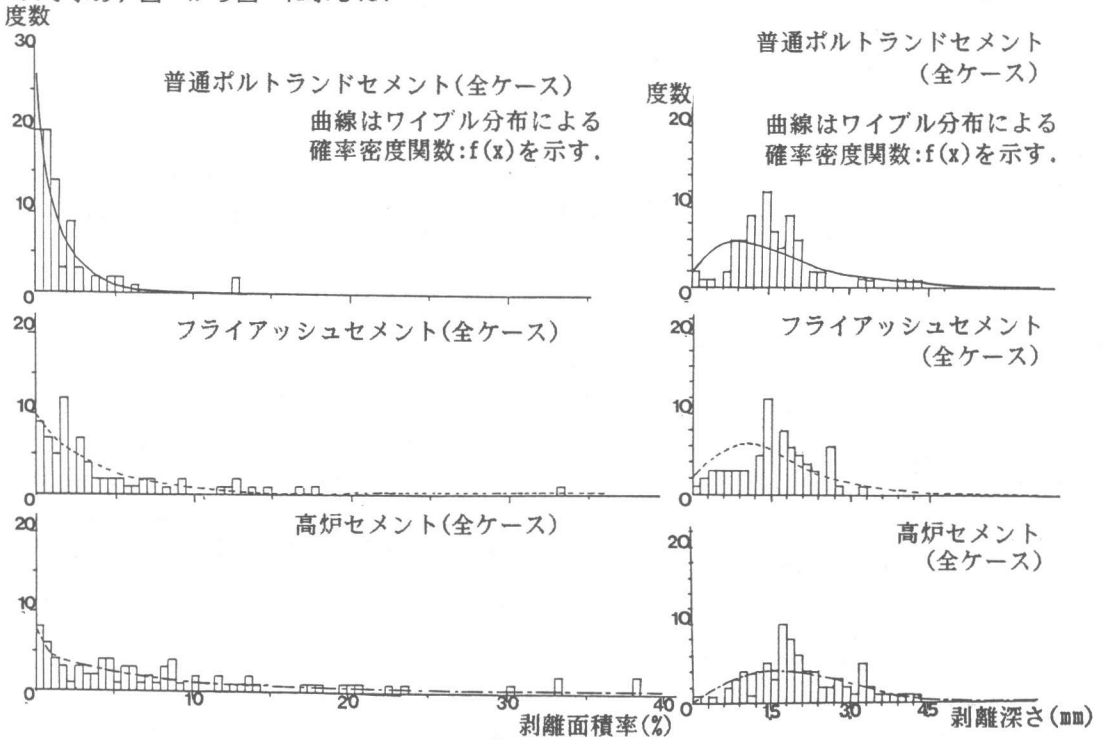


図-1 剥離面積率の分布形態

図-2 剥離深さの分布形態

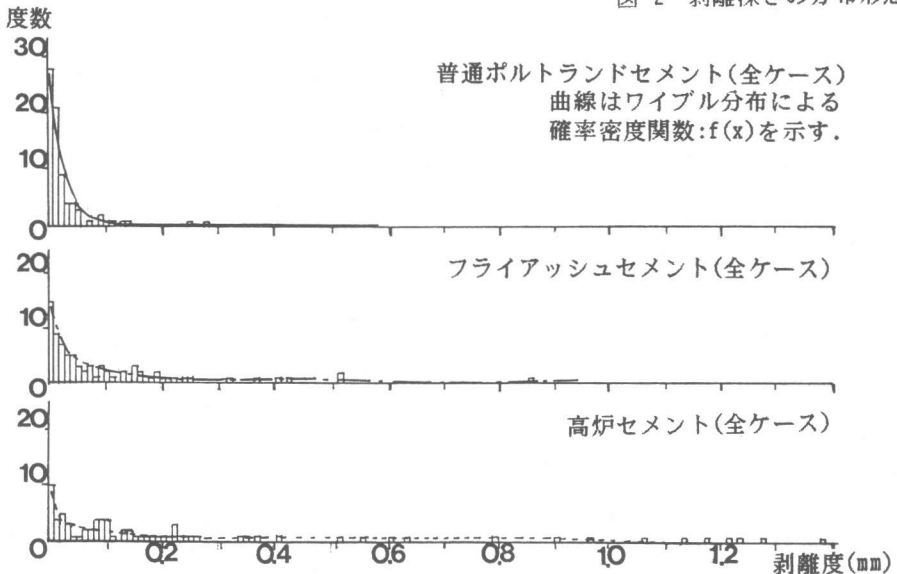


図-3 剥離度の分布形態

(2) 累積分布関数の検定

図-2から図-4の中にワイブル分布により確率密度関数化した曲線を示した。また、各データと適合したワイブル分布による確率密度関数を累積分布関数で表してコルモゴロフ・スミルノフ検定を行い、その有意性を検討した。検討した累積分布関数は、有意水準1%以内であった。

3.2 考察

(1) 劣化の分布の形態と母数の関係

剥離深さについては、各セメントとも $\alpha > 1$ となり上に凸型となった。また、形状母数 α は普通ポルトランド、フライアッシュB種、高炉B種の順に大きくなりワイブル分布の最大の度数を示す剥離深さの値が大きくなるのに対応している。また、尺度母数 β については、同様にこの順で大きくなっている。

剥離面積率及び剥離度については $\alpha < 1$ であり上に凹型で左側に偏る形になっている。普通ポルトランド、フライアッシュB種及び高炉B種の順にこの偏りは小さくなっている。また、 α については、この順に小さくなり、 β については、この順に大きくなっている。

(2) 劣化の分布の形態と経過年数の関係

経過年数と劣化を剥離度で表した分布の形態の変化を図-4に示した。これによると、経過年数とともに剥離度が増加し左から右に分布が移行する傾向が認められる。経過年数と形状母数 α の変化を図-5に示した。剥離度については、形状母数 α は、2年から9年の間では、 $\alpha < 1$ でほとんど変化していない。これに対して、尺度母数 β は、図-6に示したように経過年数とともに増加している。

(3) 劣化の分布の形態と内的要因の関係

内的要因から水セメント比、混和材(フライアッシュ)量と形状母数 α と尺度母数 β の関係を図-7から図-10に示した。水セメント比が大きくなると形状母数 α は $\alpha < 1$ でほとんど変化していない。これに対して、尺度母数 β は増加している。フライアッシュの量が多くなると形状母数 α は減少し、尺度母数 β は著しく増加している。

(4) 劣化の進行と累積分布関数

劣化の進行によって α 、 β はさらに変化すると思われる。特に、剥離面積率は、100%になるまで今後さらに増加するため被害の分布が変化し α が1より大きくなることもありえると考えられる。

なお、 $\gamma \geq 0$ とした、 α 、 β 、 γ の3母数のワイブル分布の検討と、各母数の変化を経過年数と内的要因及び外的要因の関数として表すことを現在検討中である。

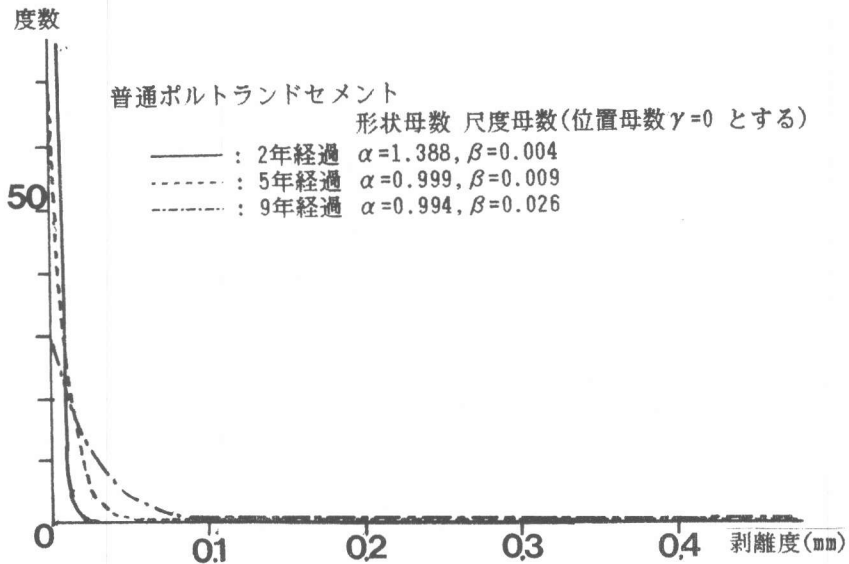


図-4 経過年数と剥離度の分布形態の関係

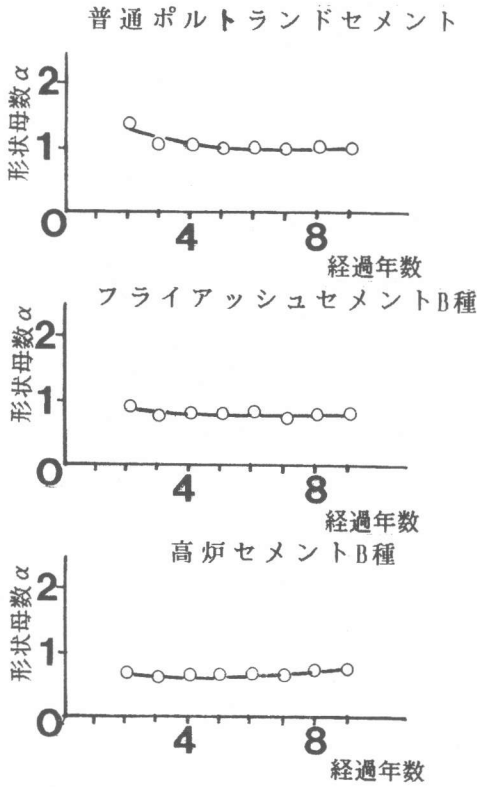


図-5 経過年数と剥離度の形状母数 α の関係

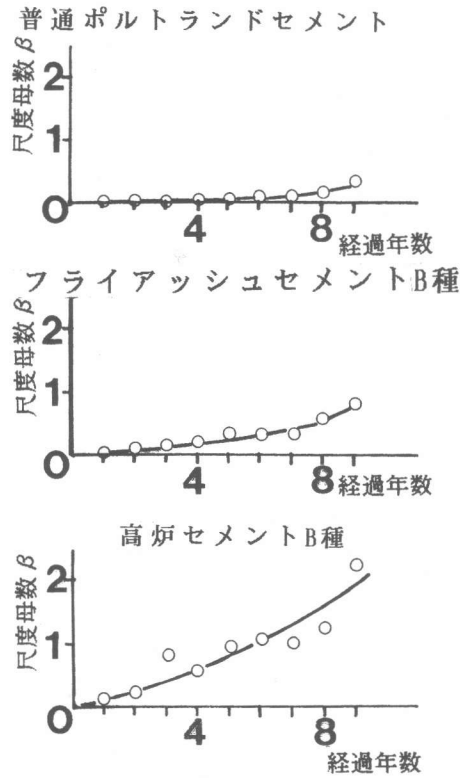


図-6 経過年数と剥離度の尺度母数 β の関係

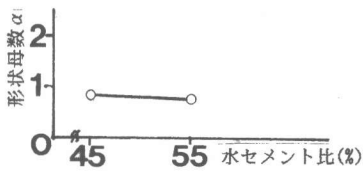


図-7 水セメント比と剥離度の形状母数 α の関係

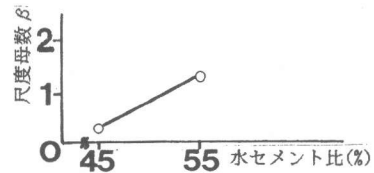


図-8 水セメント比と剥離度の尺度母数 β の関係

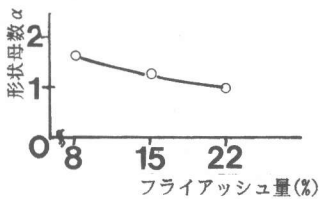


図-9 混和材(フライアッシュ混和)量と剥離度の形状母数 α の関係

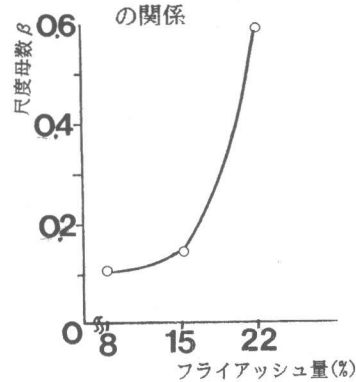


図-10 混和材(フライアッシュ混和)量と剥離度の尺度母数 β の関係

4. 結論

コンクリート構造物の経年変化推定のため、寒冷地海洋環境下に9年間曝露されたコンクリートの表面剥離被害の剥離深さ、剥離面積率及び剥離度の程度とその度数をワイブル分布により確率密度関数及び累積分布関数として表した場合以下の事が明らかになった。

- (1)剥離度に対して、形状母数 α 、尺度母数 β によって定められる二母数ワイブル分布に適合した確率密度関数 $f(x)$ は、剥離度の分布を有意水準1%でほぼ的確に表した。
- (2)剥離深さのワイブル分布の形状母数 α は、 $\alpha > 1$ となり上に分布は凸型となった。剥離面積率及び剥離度は、 $\alpha < 1$ であり分布は上に凹型で左側に偏る形となる傾向があった。
- (3)剥離度は経過年数とともに増加し分布が左から右に移行する傾向が認められ、ワイブル分布における形状母数 α は、2年から9年の間では、 $\alpha < 1$ でほとんど変化しないが、尺度母数 β は経過年数とともに増加している。
- (4)水セメント比が大きくなると剥離度のワイブル分布の形状母数 α は、 $\alpha < 1$ でほとんど変化していないが、尺度母数 β は増加している。また、フライアッシュの量が多くなると形状母数 α は減少し、尺度母数 β は著しく増加している。

今後の課題としてワイブル分布等の累積分布関数をさらにコンクリートの凍害やその他の経年変化の推定へ適用し劣化の予測の信頼性の向上をする必要がある。

〔謝辞〕

本研究に際し御指導と御協力を頂いた北海道大学藤田嘉夫教授、北見工業大学林正道学長、御協力を頂いた北見工業大学の岡田技官と猪狩技官、北見工業大学学生の宗広君他の卒論生に感謝いたします。また、本研究のは昭和63年度吉田研究奨励金及び昭和63年度文部省科学研究費補助金奨励研究(A)の助成である事を付記しここに感謝いたします。

〔参考文献〕

- 1)桜井宏，鮎田耕一，佐伯昇，岡田包儀：寒冷地海洋環境下におかれたコンクリート表層部の劣化の要因：土木学会北海道支部論文報告集，1987年1月
- 2)桜井宏，鮎田耕一，佐伯昇：寒冷地海洋環境下に曝露されたコンクリートの表層部の劣化とその要因の検討，セメント技術年報41，pp.379-382，1987
- 3)桜井宏，鮎田耕一，鈴木明人，百崎和博，佐伯昇，藤田嘉夫：RC構造物の耐久性設計及び寿命予測のための経年変化データの解析及び検討，「コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計」に関するシンポジウム論文集，JCI，pp.23-30，1988
- 4)桜井宏，鮎田耕一，佐伯昇，鈴木明人：コンクリート構造物の耐久性評価のための劣化予測式の検討と考察，第10回コンクリート工学年次講演会論文集，1988
- 5)前川善一郎：複合材料と信頼性-I.基礎概念，日本複合材料学会誌，13,3,pp.135-143，1987
- 6)前川善一郎：複合材料と信頼性-II.強度へのアプローチ，日本複合材料学会誌，13,4,pp.180-188，1987